第 37 卷第 20 期　　生　态　学　报　　Vol.37,No.20
2017 年 10 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Oct.,2017

DOI:10.5846/stxb201605170954
殷格兰,邵景安,郭跃,党永峰.林地资源变化对森林生态系统服务功能的影响——以南水北调核心水源地淅川县为例.生态学报,2017,37(20):6973-6985.
Yin G L, Shao J A, Guo Y, Dang Y F.Effects of forest resource changes on ecosystem function: a case study of Xichuan County, the main source of water for south-to-north water transfer in China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(20):6973-6985.

林地资源变化对森林生态系统服务功能的影响
——以南水北调核心水源地淅川县为例

殷格兰[1],邵景安[1,2,*],郭　跃[1,2],党永峰[3]
1 重庆师范大学地理与旅游学院,重庆　400047
2 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室,重庆　400047
3 国家林业局调查规划设计院,北京　100714

摘要:森林生态系统是人类生存与发展的基础,其服务功能不可替代。以南水北调中线工程渠首所在地淅川县为研究区,使用2004 年 TM、2009 年 TM、2014 年 GF1 号影像等数据,在 PIC、Arcgis10.0 等软件支持下,分析其 2004—2014 年的林地资源变化,并利用 InVEST 模型对森林生态系统服务功能(水源涵养、水质净化和土壤保持)进行定量评估。结果表明:①2004—2014 年县域林地资源以有林地为主,面积增长迅速,灌木林地和苗圃地面积增长缓慢,疏林地和未成林造林地面积均呈现先增后减趋势;②伴随林地资源变化,森林生态系统服务功能产生相应显著变化,10 年间县域水源涵养量功能减少 19%,森林水质净化功能提高 29%,土壤保持功能增加 6%;③同一森林类型,其生态服务功能在不同年际之间的差异表现为平均水源涵养功能逐年下降,平均水质净化能力不断提升,平均土壤保持能力先增后减;④对比 5 种森林类型的生态服务功能,有林地的服务功能最强,其次为灌木林地和疏林地;⑤10 年间县域森林生态系统的水源涵养、水质净化和土壤保持服务功能的高低与森林覆被的高低程度呈正相关,呈现出北高南低的空间分布格局;⑥科学管理森林生态系统服务的关键在于合理配置林地与其他用地的分布格局,提高林地与其它用地镶嵌构成的复合土地利用的可持续性。同时加强服务功能重要区域的保护,避免对对服务功能较差区域的破坏。此外,未来森林经营需要从单纯的森林面积扩张,转变为提高森林质量和生产力,从而加强森林生态系统对气候变化影响的适应能力。

关键词:林地资源变化;水源涵养;水质净化;土壤保持;InVEST 模型

Effects of forest resource changes on ecosystem function: a case study of Xichuan County, the main source of water for south-to-north water transfer in China

YIN Gelan[1], SHAO Jing'an[1,2,*], GUO Yue[1,2], DANG Yongfeng[3]
1 *College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing*, 400047, *China*
2 *Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing, Three Gorges Reservoir Area, Chongqing* 400047, *China*
3 *Academy of Forestry Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing* 100714, *China*

Abstract: Because forest ecosystems and the services they provide cannot be replaced, the main purpose of forest maintenance and management is to protect forests, as a basic resource for human survival and development. As a case study, the present study investigated Xichuan County, which is the main source of water for the middle route of the south-to-north water diversion project, by quantitatively analyzing changes in forest resources from 2004 to 2014, using TM and GF1 image data from 2004—2009 and 2014, respectively. On the basis of previous analyses, the InVEST model was used to quantitatively evaluate the ecosystem function of the forest (water conservation, water purification, and soil conservation).

基金项目:国务院南水北调工程建设委员会办公室 2015 年技术咨询委托项目
收稿日期:2016-05-17;　　**网络出版日期**:2017-06-01

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shao_ja2003@sohu.com

The results indicated that the area of forest increased rapidly, by 10.85% from 2004 to 2009 and by 7.44% from 2009 to 2014, which resulted in a forest area of 45.65% by 2014. From 2004 to 2014, the closed forest land of the county increased as well, whereas the area of shrubland and Nursery woodland increased more slowly, and the area of sparse woodland and non-wooded land both tended to increase and then decline in succession. As the forest resources changed, significant changes were also observed in the corresponding ecosystem functions, including 10-year water purification, which increased by 29%; water conservation, which increased by 19%; and soil conservation, which increased by 6%. Meanwhile, among the individual forest types, the average water conservation function decreased annually, whereas the average water purification capacity continuously improved, and the average soil holding capacity initially increased and subsequently decreased. Forest was the main type of landscape cover in the region, as well as the main contributor to total ecosystem function, followed by shrubland and sparse forest. During the study period, areas that contributed to the county's water conservation, water purification, and soil conservation services were strongly and positively correlated with forest area, and both improvement and expansion of forested areas enhanced the ecological services provided. In addition, the spatial distribution of the forest's ecosystem function was greater in the north than in the south. Analysis of the history and current condition of forest ecosystem management in the study area indicated that the key managing forest ecosystem service lies in maintaining an appropriate distribution of forestland and other land types, and the ecological function of the forests was affected by both forest area and structure (e.g., crown density, soil thickness, soil, root depth), as well as by meteorological factors. In order to improve forest quality and productivity, future forest management strategies need to promote the expansion of pure forestland and transformation and implement changes that will improve the ability of the forest ecosystem to adapt to climate change.

Key Words: forest resources; water conservation; water purification; soil conservation; InVEST model

森林生态系统服务功能是指森林生态系统和生态过程所维持及所形成的人类赖以生存的环境条件与效用[1-3]。近年来,随着生态环境日益恶化,人们已逐渐意识到维持和保育森林生态系统服务功能是实现社会经济可持续发展的重要基础之一[4-5]。为了科学管理森林资源,了解森林生态服务功能的作用和价值,国内外学者进行了大量研究和探索[6-9],并取得了丰厚的成果[10-13]。研究内容主要涉及水源涵养服务功能评估[14-16]、碳储量定量估算[17]、土壤保持价值估算[18-19]、森林植被对水质的影响[20-21]等。归纳起来,国外注重对生态系统结构、生态过程与森林生态服务功能关系的研究,尤其重视生态模型的发展,并在已有研究成果的基础上不断发展新的理论和方法;国内研究对象由大尺度逐渐转向中、小尺度区域,并开始重视森林生态系统服务功能的动态变化与其驱动因素[22]。

虽然现有研究在不同尺度森林生态系统服务功能评估上取得了较好的效果[23-24],但评估结果在可视性、可操作性等方面仍略有不足,即现阶段的评估大多缺乏空间上的动态展示,这在一定程度上阻碍了经营管理决策的制定。此外,尽管森林生态系统服务功能评估过程中涉及尺度在不断丰富,但目前大尺度(全球和流域)方面的研究较多[22],而以县域为水平开展的评估相对较少。县域是国家及区域森林维持和保育的重要行政层面,利用空间显式生态系统服务功能评估模型研究县域水平林地资源动态变化及其对森林生态系统服务功能的影响,不仅可以丰富研究尺度;而且,有益于直观了解森林生态系统经营的历程,分析森林生态系统经营的现状及问题。

淅川县位于汉江中上游,是南水北调中线工程的核心水源地,其区域森林生态系统服务功能的维持和改善关系到南水北调中线工程沿线城市的用水安全。基于此,本文选取淅川县为研究区,使用 2004 年和 2009 年 TM、2014 年 GF1 号影像等数据,在 PIC、Arcgis10.0 等软件支持下,分析县域 2004—2014 年的林地资源变化,利用空间显式生态系统服务功能评估软件(InVEST 模型),对森林生态系统服务功能进行定量评估和空间特征刻画,探讨林地资源变化对森林生态服务功能的影响,旨在为推进森林资源可持续经营、增强森林生态系统服务功能提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　区域概况

淅川县(110°58′—111°53′E,32°55′—33°23′N)位于河南西南部,地处鄂豫陕结合部,是南水北调中线工程的渠首。亚洲最大人工湖丹江口水库位于研究区南部。地形为西北突起向东南展开的马蹄状,东南部为冲积平原及岗地区,中部为丘陵区,西北部为山区,气候属北亚热带向暖温带过渡的季风性气候区,水系属长江流域汉江水系,丹江自西北向东南纵贯全境,丹江及其支流流域面积占全县总面积的93.5%。土壤以潮土、砂姜黑土、黄棕壤土、紫色土为主。受气候影响,研究区是南北差异的过渡地带,具有丰富的植物资源。幅员面积为2818.12km^2,辖4个乡、11个镇、2个街道办事处。2014年,全年生产总值、公共财政预算收入、全社会固定资产投资、城镇居民人均可支配收入、农民人均纯收入,分别为181亿元、7亿元、223亿元、22639元、8057元,同比分别增长8.6%、53%、20%、10%和11%。

1.2　数据来源

选取研究区2004年30m空间分辨率TM、2014年2m空间分辨率全色波段GF1号为遥感信息源,TM影像从USGS网站(http://earth explorer.usgs.gov/)获取,GF1号影像从中国资源卫星应用中心获取(http://www.cresda.com/CN/);2009年研究区森林资源调查数据(矢量小班数据),2004—2014年研究区各乡(镇)监测年度的营造林、森林采伐及占用征收林地等设计、验收和专项调查资料以及研究区3期森林资源清查固定样地调查数据来源于国家林业局调查规划设计院;日最高温、日最低温、日均温、太阳大气顶层辐射和降雨等气象数据来源于河南省气象厅和中国气象科学数据共享服务网;径流、泥沙、水环境数据来源于河南省水利科学研究院;1∶100万土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所;DEM(空间分辨率为30m×30m)来源于USGS网站(http://earth explorer.usgs.gov/);研究区2010年基础地理信息数据,主要包括水系、道路、铁路分布,研究区范围界线及乡(镇)行政界线和居民地数据由研究区林业局提供。本研究使用的社会经济数据来源于《中国县市社会经济统计年鉴》和淅川县统计资料,其它数据均来自相关文献和资料。

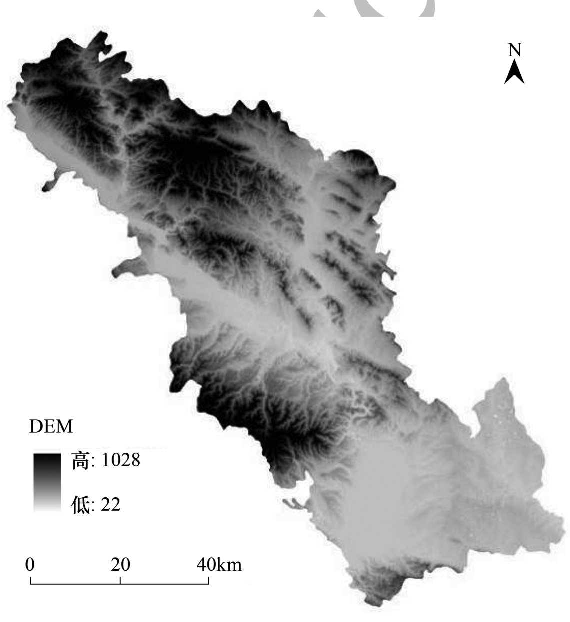


图1　研究区DEM图

Fig.1　Topography in the study site

1.3　数据处理

遥感影像处理技术方法参照《遥感影像平面图制作规范》(GB 15968—1995)和《森林资源调查卫星遥感影像图制作技术规程》(LY/T 1954—2011)执行。采用PIC软件对遥感影像进行几何校正和地形校正(误差控制在0.5个像元之内),对2014年GF1号影像进行453波段的图像融合,2004年、2009年TM影像进行432波段合成。根据研究区森林资源状况及研究需要,参照《中华人民共和国林业行业标准》(LY/T1955—2011)将林地划分为5种类型(表1),非林地划分为建设用地、耕地、水域、其他用地4个二级用地。在Arcgis10.0软件里通过掩膜提取覆盖研究区2014年、2009年、2004年森林资源信息。以2009年林地保护利用规划数据为基础,根据遥感影像变化情况,借助2004—2014年期间的营造林、森林采伐及占用征收林地等设计、验收等资料,整理研究区15个乡镇和2个街道办事处2004年以及2014年小班矢量数据。以室内解译的小班为底图,进行以小班为单元的现地验证,对2014年解译出的土地利用图予以修正。

为确保获取的2004年土地利用图的准确性,对2004年土地利用数据的提取采用TM影像解译与参与式

农户访谈验证相结合的方法进行:如果只使用 2004 年的 TM 遥感影像进行解译,数据获取粒度较粗。但是,若只以 2009 年解译验证后的土地利用图为底图,在此基础上,通过参与式农户访谈让当地农户进行逐一小班的追溯,无法确保非遥感辅助数据来源准确性。因此,本文使用二者相结合的方法获取 2004 年土地利用数据,具体的实施过程是:首先,通过一般的遥感影像处理方法对 2004 年 TM 遥感影像进行处理,并将其与其他数据一起作为 2004 年土地利用信息提取的辅助数据;然后,以 2009 年的土地利用图为底图让当地农户进行逐一小班的追溯,并参照 2004 年 TM 遥感影像对追溯反演的结果进行验证,提高结果的正确性。

据此对解译和追溯结果进行野外抽样调查对解译的结果进行精度检验。根据判读区划结果,2014 年机械抽选 127 个小班,面积 403.37hm^2。经现地核实,变化地块判读正确的有 117 块,面积 365.52 hm^2,正判率为 92.13%;2004 年机械抽取 110 块小班,面积 1233.05 hm^2。经现地核实,未变化地块判读正确的有 93 块,面积 1144.35 hm^2,正判率为 92.81%。正判率均达到本文研究的精度要求。

1.4 研究方法

1.4.1 模型原理

InVEST 模型,即生态系统服务和交易的综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)是由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发,量化和价值化生态系统服务的综合模型,InVEST 模型能够模拟预测不同森林景观类型下生态系统服务功能的变化,评估结果直观体现生态系统服务功能的空间格局[25-28]。InVEST 模型的最大优点是评估结果的可视化表达,解决了以往生态系统服务功能评估用文字抽象表述而不够直观的问题。根据研究区实际情况和研究目的,本研究选取了“水源涵养”、“水质净化”和“土壤保持”共 3 个子模块,使用 InVEST2.4.1 版本,采用栅格单元进行评估,经过权衡最后确定评估栅格为 30m×30m。

(1)水源涵养服务

根据水量平衡原理计算流域产水量,在产水量基础上计算水源涵养量。首先,用降水量减去蒸散量决定流经每一栅格的产水量,然后在子集水层次对每一栅格产水量求和,并计算每一栅格产水量的均值。基于像元尺度计算可显示产水量的关键驱动因子(土壤类型、降雨量、植被类型等)的异质性。计算方法[29]:$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right)$,式中 Y_{xj} 为森林类型 j 、栅格单元的产水量 x ; AET_{xj} 为森林类型 j 、栅格单元 x 的实际年实际蒸散量; P_x 为栅格单元 x 的年降水量。

产水量计算基于一个简化的水文循环模型,忽略地下水影响,由降雨量、潜在蒸散量、土壤深度、植物可利用水、蒸散系数以及根系深度等参数综合决定。其中,年降水量利用研究区及周边县气象站点多年降雨量观测数据在 ArcGIS 平台中进行空间插值获得;潜在蒸散量计算根据 Modified-Hargreaves 法[30]求得各气象站点的潜在蒸散量,再在 ArcGIS 平台中进行空间插值获得;植物可利用水运用非线性拟合土壤 AWC 估算模型获得[31];土壤深度根据森林二类调查数据通过“克里金”插值获得;蒸散系数、根系深度和流速系数等数据通过查阅相关文献资料得到。

其次,在产水量基础上,再考虑土壤厚度、渗透性、地形等因素影响计算水源涵养量。水源涵养量计算模型[32]: $WR = (1 - TI) \times \min(1, Ksat/300) \times \min(1, TravTime/25) \times Yield$,式中, WR 为多年平均涵养水量(mm); TI 为地形指数,无量纲,根据 DEM 计算;Ksat 为土壤饱和导水率(cm/d);TravTime 为径流运动时间(min),用坡长除以流速系数(vel_coef)得到。

最后,对各森林类型各个像元水源涵养量求和,再除以各森林类型面积即可得到各森林类型单位面积水源涵养量,用以表征森林生态系统所具有的水源涵养功能。

(2)水质净化服务

“水质净化”模型用水体中总氮(TN)含量表征水质状况,只考虑非点源污染,TN 输出越高,水质净化功能就越差。坡度决定水流路径,根据森林类型所模拟的污染物净化能力,计算每一像元截留其上游像元输出

污染物的量。首先,通过产水量模型计算年平均径流量,然后计算各斑块污染物截留量。计算方法:$ALV_x = HSS_x \cdot pol_x$,式中 ALV_x 为栅格 x 调整后污染物输出值;HSS_x 为栅格 x 水文敏感性得分,pol_x 为栅格 x 输出系数。模型中涉及的主要参数有:产水量数据、DEM、TN 输出负荷、森林类型数据等。最后,对各森林类型各个像元 N 输出求和,再除以各森林类型面积即得各森林类型平均 N 输出,用以表征森林生态系统所具有的水质净化功能。

(3)土壤保持服务

"土壤保持"模型利用基于像元尺度的通用土壤流失方程(USLE)计算每一斑块潜在土壤流失量和泥沙输移情况,土壤侵蚀量越小,土壤保持功能越好。首先,计算当栅格无植被覆盖时的潜在土壤流失率(潜在土壤侵蚀量),计算方法:$USLE_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \cdot C_x \cdot P_x$,式中 $USLE_x$ 为像元 x 土壤侵蚀量;R_x 为降雨量侵蚀因子;K_x 为土壤可蚀性因子;LS_x 为坡长坡度因子;C_x 为植被覆盖因子;P_x 为土壤保持措施因子。在输入参数中,降雨侵蚀力因子采用 Wischmeier 的月尺度公式[33]计算出各雨量站点值,再在 ArcGIS 平台中利用"克里金"空间插值而得到;土壤可蚀性(K)值估算,利用 Williams 提出的计算方法[34]得到。其次,计算有植被覆盖的每个栅格单元的侵蚀量(现实土壤侵蚀量/泥沙输出量),计算公式:$RKLS_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x$,每一像元土壤保持量由潜在土壤侵蚀量减去现实土壤侵蚀量/泥沙输出量得到,计算公式:$T_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \cdot (C_x \cdot P_x - 1)$,式中参数含义如上。最后,对各森林类型各像元土壤保持量 T_x 求和,再除以各森林类型面积即可得到各森林类型单位面积土壤保持量,用以表征森林生态系统所具有的土壤保持功能。

1.4.2 模型校验

首先,将初步模拟的结果与实际观测数值进行比较,若二者偏差值较大,参考相关的文献和数据,调整模型参数,输出结果,将输出结果再次与实际观测数值进行比较。通过对模型进行反复校检,经校验显示最终模拟结果与实测数值之间的决定系数 R^2 均超过 0.76 。然后,用校验确定的参数运行模型。

2 结果与分析

2.1 林地资源变化分析

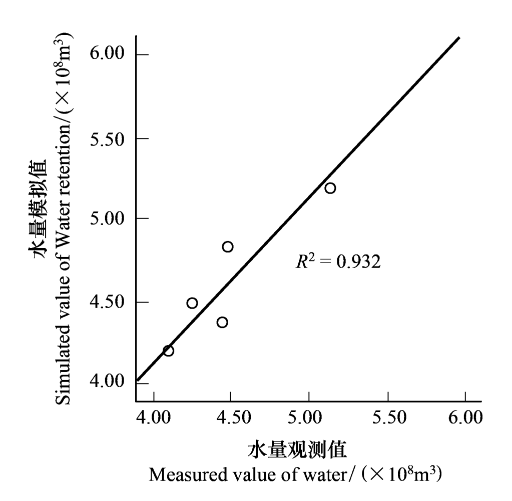
林地是整个研究区的景观基质,对整体景观有较大的贡献,而且,10 年间森林以有林地为主,且面积呈持续增加趋势,2004—2009 年、2009—2014 年分别增加 3.23% 和 3.74%。前期有林地扩张以北部为主,后期以中部和西北部为主(表 1)。10 年间灌木林地和苗圃地虽有增加,但二者的增加幅度仍相对较低。疏林地和未成林造林地均呈先增后减趋势,但二者变化特征不同,10 年间,疏林地增加 21.34 hm^2,未成林造林地减少 1532.96 hm^2。总体上,研究区森林总面积增长较快,2004—2009 年森林总面积增加 10.85%,2009—2014 年增加 7.44%,到 2014 年森林覆盖率高达 45.65%。

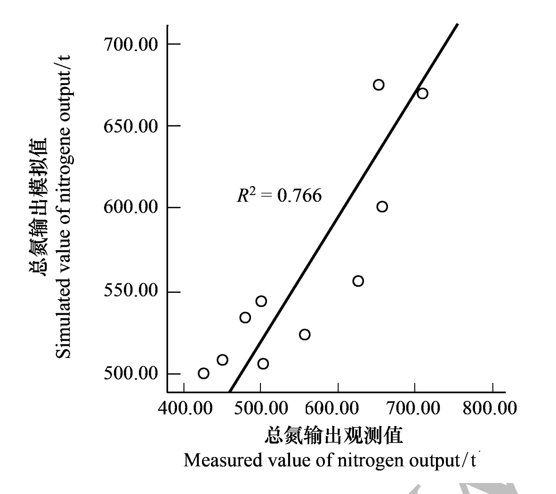
表 1 各森林类型统计表

Table 1 Statistics and ratio of l forest cover changes

地类 Land type	2004		2009		面积变化 Area change/hm^2	2014		2009—2014 变化/hm^2 Area change
	面积/hm^2 Area	%	面积/hm^2 Area	%		面积/hm^2 Area	%	
有林地 Closed forest land	100989.56	35.84	110100.98	39.07	9111.42	120646.00	42.81	10545.02
疏林地 Sparse woodland	2313.66	0.82	2351.01	0.83	37.35	2335.00	0.83	-16.01
灌木林地 Shrub	4625.65	1.64	4631.32	1.64	5.67	4674.87	1.66	43.55
苗圃地 Nursery garden	180.00	0.06	201.00	0.07	21.00	201.21	0.07	0.21
未成林造林地 Unwoodland	2334.04	0.83	2462.06	0.87	128.02	801.08	0.28	-1660.98

表中的比例为各森林类型占县域总面积的比例





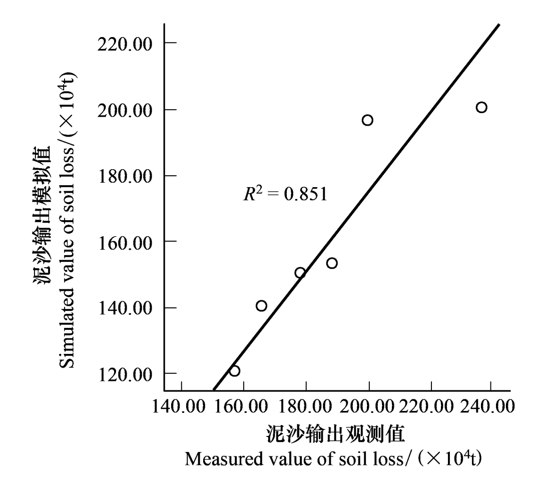


图 2　模型校验结果

Fig.2　The results of model validation

2004—2014 年淅川县迎来"森林转型"时期,即自然生态用地(林地)呈现扩张的状态。"森林转型"一方面是受"生态县"战略政策所驱动,政府大搞造林绿化攻坚战,但森林面积的持续增加,最根本还是由于经济的驱动。在工业化、城镇化快速提升背景下,非农务工工资迅速攀升(路易斯拐点),务农机会成本增加,从而导致大量劳动力从农村"析出"。2004 年左右研究区人口红利进入衰减期,2009 年以来南水北调移民至外县市的人口高达 16.2 万。农村人口向城市迁移、南水北调移民,劳动力成本的上升使得耕作成本较高的劣质耕地退出农业生产,农业在与森林争夺土地资源的过程中失去优势,这给森林面积的扩张提供了机会[35]。

2.2　森林生态服务功能响应

2.2.1　水源涵养服务

水源涵养服务功能在县域内表现出明显的空间差异(图 3)。水源涵养功能高值区位于北部山地,多年平均水源涵养量 182.08—238.81mm。次高值区位于西部低山地区,多年平均水源涵养量 137.20—166.63mm。与北部山地不同的是,西部低山区虽然水源涵养功能总体较高,但分布不及前者集中,在高涵养区中间同时还散布一些中低功能区。水源涵养功能较差的地区主要分布于东南部的岗地及冲积平原地区,多年平均水源涵养量 89.44—128.48mm。这一结果表明,研究区范围内水源涵养服务功能的高低与森林覆被的高低程度呈正相关。北部地形高,是森林主要连片分布区;西部是由地势起伏向地势平缓的过渡区,是森林和其它地类交错分布区;东南部海拔较低且地势相对平缓,土地利用类型以耕地和建设用地为主,森林分布相对较少。

2004—2014 年研究区森林生态水源涵养量持续下降,3 期水源涵养量分别为 3.73 亿 m^3、3.65 亿 m^3、3.03 亿 m^3,10 年间,研究区县域范围内森林水源涵养量减少了 19%。森林的水源涵养量不仅受到森林本身结构

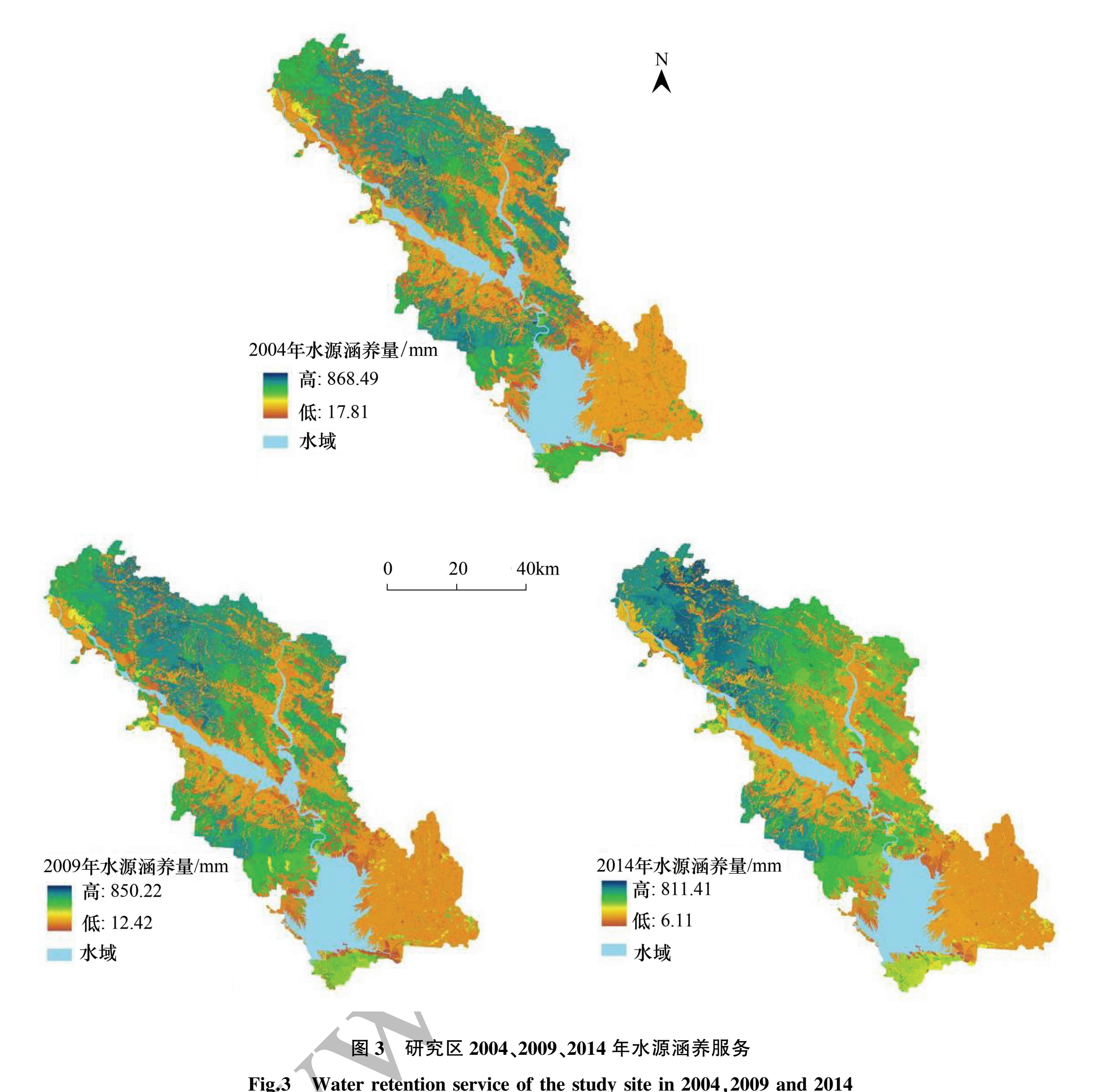


图 3　研究区 2004、2009、2014 年水源涵养服务

Fig.3　Water retention service of the study site in 2004,2009 and 2014

和数量的影响,还会受到降雨的影响,由于森林与气候间存在着密切关系,降雨变化将不可避免地对森林的结构和功能产生不同程度的影响。2004、2009 和 2014 年研究区年平均降雨量分别为 841mm、785mm 和 688 mm,呈下降趋势,降雨量的变化规律与研究区森林生态水源涵养量变化规律一致。表明,随着降雨的减少,森林生态水源涵养量也有所下降。由于总量的减少,各森林类型的平均水源涵养量总体上也呈现减少趋势。

在 5 大森林类型中,3 期各森林类型的平均水源涵养量大小顺序均为有林地 > 灌木林地 > 疏林地 > 苗圃地 > 未成林造林地(表 2)。从各森林类型单位面积水源涵养量以及总量来看,有林地是研究区水量涵养的主要贡献地类,有林地的变化对流域水量变化起决定作用。其次为灌木林地和疏林地,苗圃地和未成林对研究区水量涵养贡献较小。这可能与各森林类型的郁闭度、土层厚度以及根系深度等因素有关。有林地比其它林地有更高的郁闭度、冠层密度和植株密度,使得与雨滴接触的枝叶表面积相应较大,增加林冠层的截留量。有林地土壤因具有良好的结构和植物腐根造成的孔洞,渗透快且蓄水量大,即使在特大暴雨情况下形成坡面径流,其流速也比其它林地大大降低。

2.2.2　水质净化服务

2004、2009、2014 年研究区范围内 N 的输出均为东南部最高,中部次之,北部最低(图 4)。通常情况下,N 素输出量越高,水质净化服务功能越差[34],即 2004、2009、2014 年水质净化能力北部最强,中部次之,东南部最弱。三期水质净化服务功能均呈现出北高南低的总体格局,这与森林分布格局一致,说明森林能够通过储

存、转化等形式移除污染物而减少其向水库、河流等水体的输出。

表 2 研究区 2004、2009、2014 各森林类型平均水源涵养量/mm

Table 2 The average amount of water retention service of the study site in 2004, 2009 and 2014

年份 Year	有林地 Closed forest land	疏林地 Sparse wood land	灌木林地 Shrub	苗圃地 Nursery	未成林造林地 Unwoodland
2004	347.47	238.70	295.59	178.29	126.03
2009	314.16	214.74	250.35	158.16	107.15
2014	239.89	162.24	183.04	119.10	76.25

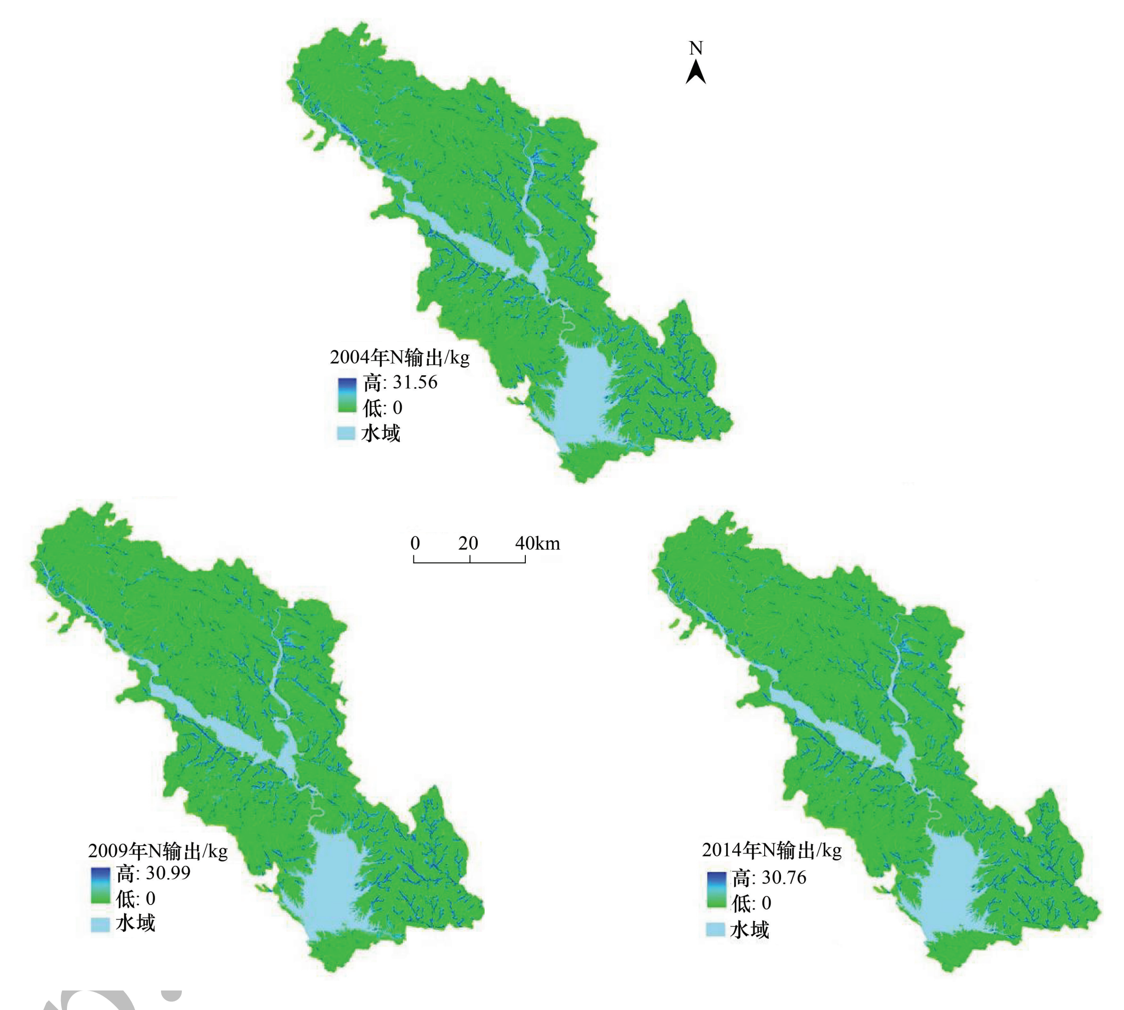


图 4 研究区 2004、2009、2014 年 N 输出

Fig.4 Nitrogen average output of the study site in 2004, 2009 and 2014

2004—2014 年,随着森林的扩张,森林 N 输出总量呈持续减少趋势,3 期输出量分别为 254.08t、207.47t、180.48t(有显著减少特质),10 年间,研究区森林水质净化功能提高了 29%。林地面积持续扩张,由于林地有较好的 N 素吸收去除能力,从而直接有助于 N 输出的减少。而且,研究区耕地面积的持续减少,也在很大程度上减少面源污染的发生,减少 N 输出。2004—2014 年研究区水质净化功能的增幅与森林面积的扩张速率保持一致,比较前后两个时期发现,研究区水质净化功能的增幅前 5 年比后 5 年更加明显。这是由于 2009—2014 年灌木林和未成林造林地面积呈负增长态势,森林总面积的增幅比前期小,从而导致这一时期水质净化功能增幅更小。

2004—2014 年各森林类型(除未成林造林地外)的平均 N 输出总体上呈现减少趋势,表明各森林类型的

水质净化能力在不断提升(表 3)。淅川县在全国的定位为"生态县",近年来政府大搞造林绿化攻坚战,加强森林建设,不断提高总体森林质量,因此各森林类型的水质净化能力也得到提高。

在整个研究时期内,5 大森林类型,3 期各森林类型的平均 N 输出大小顺序均表现为有林地<灌木林地<疏林地<未成林造林地<苗圃地。各森林类型的净化水质能力即为有林地>灌木林地>疏林地>未成林造林地>苗圃地。结果说明:森林生态系统对水质影响,随郁闭度的增加而增强。林冠层是影响水质的重要层次,森林郁闭度越大,对氮素吸收去除能力越强[36]。此外,有林地土壤因具有良好的结构和更厚的土层厚度,其对氮素也具有更大的吸附存储作用。

表 3　不同年份森林类型单位面积 N 输出/(kg/hm^2)

Table 3　The forest land types of nitrogen average output in different years

年份 Year	有林地 Closed forest land	疏林地 Sparse wood land	灌木林地 Shrub	苗圃地 Nursery	未成林造林地 Unwoodland
2004	2.19	2.72	2.57	6.98	5.75
2009	1.59	2.53	2.52	6.58	5.47
2014	1.31	2.51	2.39	6.13	5.20

2.2.3　土壤保持服务

研究区土壤保持功能空间差异显著,北部区整体土壤保持功能较好,西南部和中部其次,土壤保持功能较低的主要分布于东南部(图 5)。2004—2014 年,研究区西北部土壤保持功能有较大幅度的提升。这与森林的分布和扩张方向一致,说明土壤保持功能的高低与森林覆被的高低程度呈显著正相关,总的来看,森林的土壤保持功能比其它土地覆盖类型都高。森林生态系统的生物多样性较高,植被覆盖度也相对较好,因而不仅自身泥沙输出负荷小,而且还有较好的泥沙截留能力[35]。2004—2014 年北部区域森林的面积(尤其是有林地面积)远高于其它地区,致使该区域现实土壤侵蚀量(泥沙输出量)小。西北部森林面积的迅速扩张,对区域土壤截留更大。受耕作扰动及地形影响,农田比其他土地覆盖类型具有更高的泥沙输出负荷,因此在过去的 10 年间,东南部的土壤保持功能显著偏低。

2004、2009、2014 年现实土壤侵蚀总量(泥沙输出量)分别为 65.58 万 t、61.57 万 t、54.32 万 t,呈持续减少格局(表 4),这一结果表明,2004—2014 年伴随森林面积的不断增加,研究区各森林类型泥沙截留量也在持续增长,即是说,扩大森林面积有利于降低区域泥沙输出量。土壤潜在侵蚀总量呈先增再减的变化趋势,3 期森林土壤潜在侵蚀总量分别为 2683.08 万 t、2953.73 万 t、2820.49 万 t,这是由于 2009 年降雨季节分配不均匀,6、7 月降雨集中,R 值贡献率大,诱发土壤潜在侵蚀的增加,进而导致虽然森林类型泥沙截留总量在持续增长,但因 2009 年土壤潜在侵蚀量的异常增大,从而使得 2009—2014 年的土壤保持量减少 126.63 万 t。在整个研究时期内,研究区各森林类型的土壤保持量(潜在侵蚀与现实侵蚀的差值)也呈先增再减的变化趋势。3 期土壤保持量分别为 2616.95 万 t、2892.17 万 t、2765.54 万 t,总体上研究区土壤保持量增加 148.89 万 t,增幅达 6%,这表明研究区森林的土壤保持服务有较大的改善。2004—2014 年各森林类型的平均土壤保持量总体上呈现先增后减的趋势。前期的增加原因如下:一是由于森林质量的提高,各森林类型泥沙截留量增长;二是这一时期降雨季节分配不均匀,6、7 月降雨集中,R 值贡献率大,诱发土壤潜在侵蚀的增加。后期虽然由于森林质量的提高,各森林类型泥沙截留量也在增长,但是降雨分配较均匀,降雨侵蚀力小,土壤潜在侵蚀量远低于前者。

研究区有林地单位面积土壤保持量远高于其它森林类型,灌木林地单位面积土壤保持量略高于疏林地,但差异不大,苗圃地次之,未成林造林地单位面积土壤保持量远低于其它森林类型(表 5)。总体来说,在 5 大森林类型中,3 期各森林类型平均土壤保持大小顺序均为有林地 > 灌木林地 > 疏林地 > 苗圃地 > 未成林造林地。森林林冠能够拦截部分降水,削弱雨滴对地表的侵蚀(即林冠郁闭度与植被削弱降雨的势能的作用成正比),因此郁闭度大的林地更有利于减少降雨对土壤的侵蚀[37]。森林还通过植被根系固持土壤,改良土壤结

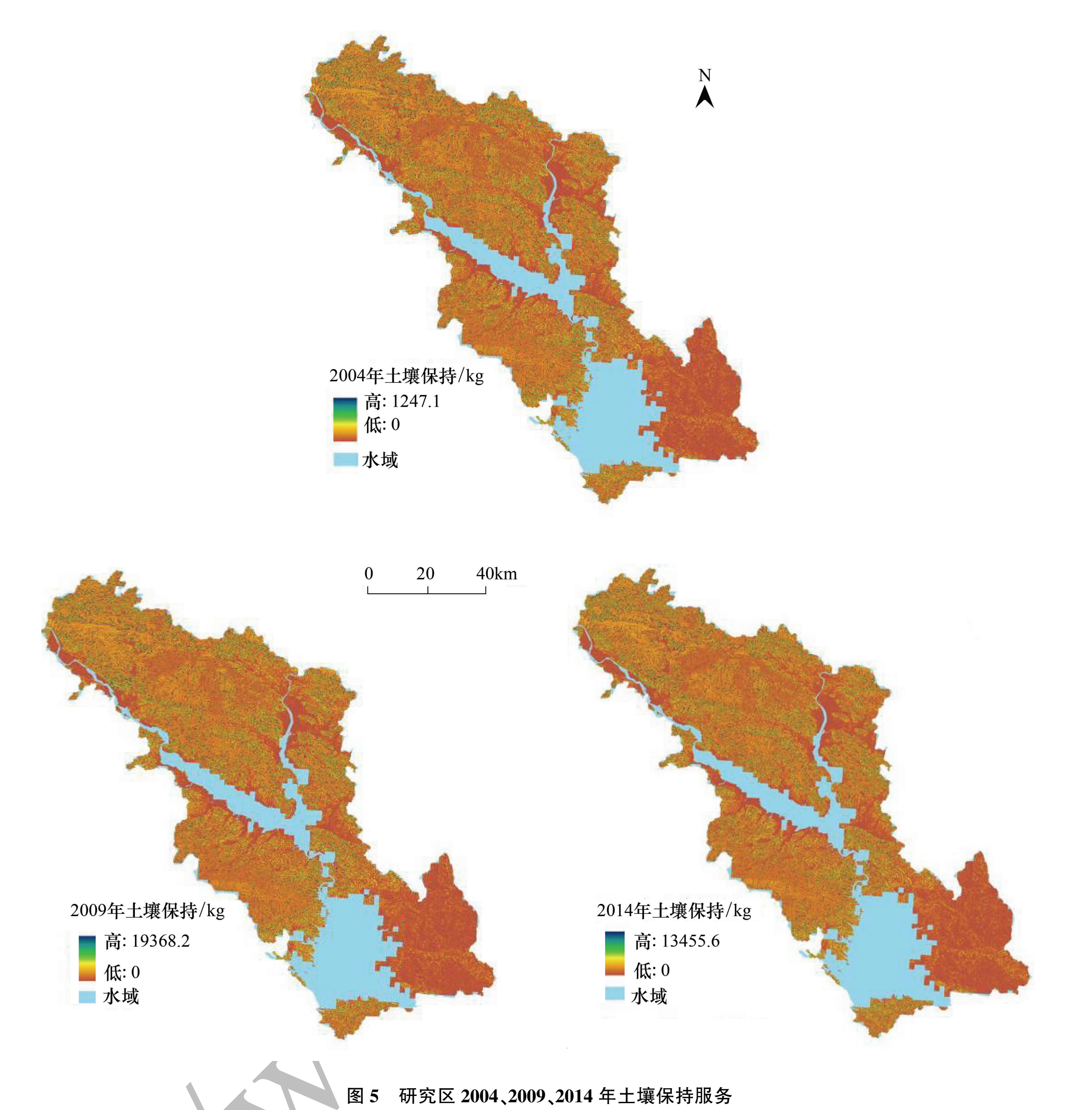


图 5 研究区 2004、2009、2014 年土壤保持服务

Fig.5 The soil conservation of the study site in 2004,2009 and 2014

表 4 不同年份森林类型土壤侵蚀与土壤保持/万 t

Table 4 The soil erosion and soil conservation of different forest land types in different years

地类 Land type	2004 年土壤侵蚀 Soil erosion of 2004		2009 年土壤侵蚀 Soil erosion of 2009		2014 年土壤侵蚀 Soil erosion of 2014		2004 年土壤保持总量 Soil conservation of 2004	2009 年土壤保持总量 Soil conservation of 2009	2014 年土壤保持总量 Soil conservation of 2014
	潜在侵蚀 Potential erosion	现实侵蚀 Realistic erosion	潜在侵蚀 Potential erosion	现实侵蚀 Realistic erosion	潜在侵蚀 Potential erosion	现实侵蚀 Realistic erosion			
有林地 Closed forest land	2513.71	57.89	2778.02	54.25	2685.96	49.27	2455.34	2723.77	2636.12
疏林地 Sparse wood land	44.18	2.01	45.08	1.91	40.23	1.70	42.13	43.17	38.49
灌木林地 Shrub	87.93	2.86	90.97	2.50	83.89	2.30	85.05	88.47	81.57
未成林造林地 Unwoodland	36.75	2.71	39.15	2.80	9.94	0.95	34.04	36.35	8.99
苗圃地 Nursery	0.51	0.11	0.51	0.11	0.47	0.10	0.39	0.41	0.37

构,提高土壤的抗蚀性。有林地的根系深度高于其他林地,通过植被根系固持土壤更多,同时其根系的腐烂和枯落物的分解,可以增强土壤肥力,改善土壤物理性质与结构,使土壤容重变小、抗冲性和入渗加强[38]。此外,随着坡度增大,潜在的土壤侵蚀量越大,森林土壤保持越大。有林地连片分布于海拔高、坡度较陡的北部山区,这是有林地土壤保持量高于其他林地的又一重要因素。

表 5　不同年份森林类型单位面积土壤保持量/(t/hm^2)

Table 5　The per unit area of soil conservation of different forest land types in different years

年份 Year	有林地 Closed forest land	疏林地 Sparse wood land	灌木林地 Shrub	苗圃地 Nursery	未成林造林地 Unwoodland
2004	226.27	176.48	176.56	165.91	35.34
2009	229.42	180.12	183.47	167.56	36.13
2014	204.59	161.07	167.90	122.20	33.01

3　结语

(1)研究时期内研究区森林总面积增长较快,2004—2009 年增加 10.85%,2009—2014 年增加 7.44%,到 2014 年森林覆盖率高达 45.65%。在林地资源演化趋势上,有林地、疏林地、灌木林地和苗圃地与林地资源的整体演化格局一致,而未成林造林地呈减少的趋势。

(2)从空间分布上看,2004、2009、2014 年研究区水源涵养、水质净化和土壤保持功能均呈北高南低的分布格局,这与森林分布格局一致。总的来看,森林的生态服务功能比其它土地覆盖类型都高。

(3)从总量变化上看,10 年间,研究区森林水源涵养量功能减少 19%,水质净化功能提高 29%,土壤保持功能增加 6%。各森林类型其生态服务功能年际差异表现为:单位面积水源涵养量均有所下降,水质净化功能持续提高,土壤保持功能先增后减。森林的生态服务功能不仅受到森林本身数量和结构(郁闭度、土层厚度、土质、根系深度等)的影响,还会受到气象因素的影响,由于森林与气候间存在着密切关系,区域的气候变化也会不可避免地对森林的结构和功能产生不同程度的影响。但总的来看,随着森林面积的扩张和质量的提高,森林的总体生态服务增强。

(4)对 2004、2009、2014 年各森林类型单位面积水源涵养、水质净化和土壤保持功能予以比较。从各森林类型的面积和单位面积生态服务功能大小来看,有林地不仅是区域主要景观类型,也是森林生态系统服务功能总量的主要贡献者,其次为灌木林地和疏林地。

如何采取有效的管理措施来对森林生态系统服务功能进行科学管理,进而实现生态效益最优化发展一直是众多学者关注的焦点[39]。郭中伟认为生态系统结构的空间异质性,终将导致生态系统服务功能的空间异质性[40]。本研究关注的森林生态系统服务的共同驱动力是林地资源变化,林地资源变化会导致森林生态系统服务功能空间分布的不均匀性。模型输出结果将有助于森林经营管理者了解区域内某一地区林地变化是如何引起服务功能数量和空间上的变化,以便有针对性的对服务功能重要区域进行保护和管理,并通过制定适当的林地利用规划来实现森林资源的可持续经营。

分析研究区森林生态系统经营的历程和现状,管理森林生态系统服务的关键在于合理配置林地与其他用地的分布格局,提高林地与其它用地镶嵌构成的复合土地利用的可持续性。研究区土壤保持量空间分布图显示海拔高、坡度较陡的北部山区的林地变化会导致最大的侵蚀问题,在未来的规划中可以对这一区域进行林地利用改造,提高该区林地的郁闭度,从而增强森林的抗侵蚀能力。通过 N 输出空间分布图,管理者可以了解生态系统对缓解水体污染的信息,以便对保持水质的重要区域(北部)进行保护,同时可以利用这些信息规避对污染物贡献最大的东南部地区的破坏。森林能减少污染物向水库、河流等水体的输出,因此河边和库区周边的森林尤其重要,它是截留污染物避免其进入水体的最后一道屏障。为保证整个区域水质达标,可在丹江口库区和境内河流附近,建设 80m 宽河岸带。

此外,评估结果显示,县域森林面积的扩张虽然很好的改善了净化水质服务和土壤保持服务,但是在降雨减少的影响下,水源涵养服务发生退化。在未来的时间里气候变化仍然具有很大的不确定性,气候变化会影响森林生态系统结构和功能。未来森林经营战略需要从单纯的森林面积扩张,转变为提高森林质量和生产力(如通过补植造林、退耕还林、防护林建设等措施加强森林建设,提高森林郁闭度),从而提高其对气候变化的应对能力[41]。

参考文献(References):

[1] 王兵, 魏江生, 胡文. 中国灌木林-经济林-竹林的生态系统服务功能评估. 生态学报, 2011, 31(7): 1936-1945.

[2] 靳芳, 鲁绍伟, 余新晓, 饶良懿, 牛建植, 谢媛媛, 张振明. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1531-1536.

[3] 赵景柱, 肖寒 吴刚. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析, 应用生态学报, 2000, 11(2): 290-292.

[4] 张岑, 任志远, 高孟绪, 阎文浩. 甘肃省森林生态服务功能及价值评估. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 147-151.

[5] 肖强, 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 向轼, 李勇志. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2014, 34(1): 216-223.

[6] Li T, Cui Y h, Liu A G. Spatiotemporal dynamic analysis of forest ecosystem services using "big data": A case study of Anhui province, central-eastern China. Journal of Cleaner Production, 2017, 142:589-599.

[7] 张秋根, 王桃云, 钟全林. 森林生态环境健康评价初探. 水土保持学报, 2003, 17(5): 16-18.

[8] 陈雪峰, 黄国胜, 夏朝宗, 陈新云. 全球森林资源评估方法与启示. 林业资源管理, 2005, (4): 24-29.

[9] 吴霜, 延晓冬, 张丽娟. 中国森林生态系统能值与服务功能价值的关系. 地理学报, 2014, 69(3): 334-342.

[10] Li M S, Huang C Q, Zhu Z L, Shi H, Lu H, Peng S K. Assessing rates of forest change and fragmentation in Alabama, USA, using the vegetation change tracker model. Forest Ecology and Management, 2009, 257(6): 1480-1488.

[11] Daily G C, Postel S, Bawa KS, Kaufman L. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington D. C.: Island Press, 1997.

[12] 肖建武, 康文星, 尹少华, 姚利辉, 郭清, 王卫文. 广州市城市森林生态系统服务功能价值评估. 中国农学通报, 2011, 27(31): 27-35.

[13] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例. 应用生态学报, 2000, 11(4): 481-484.

[14] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远. 江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估. 地理科学进展, 2012, 31(3): 330-336.

[15] Zhang B, Li W H, Xie G D, Xiao Y. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1416-1426.

[16] Guo Z W, Gan Y L. Ecosystem function for water retention and forest ecosystem conservation in a watershed of the Yangtze River. Biodiversity & Conservation, 2002, 11(4): 599-614.

[17] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexier M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 1994, 263(5144): 185-190.

[18] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 祁悦. 森林生态系统土壤保持价值的年内动态. 生态学报, 2010, 30(13): 3482-3490.

[19] 胡胜, 曹明明, 刘琪, 张天琪, 邱海军, 刘闻, 宋进喜. 不同视角下 InVEST 模型的土壤保持功能对比. 地理研究, 2014, 33(12): 2393-2406.

[20] Lukina N V, Nikonov V V, Gorbacheva T T. Natural water quality formation in forest-covered divide areas in northern Taiga. Water Resources, 2001, 28(4): 438-450.

[21] 张胜利, 李光录. 秦岭火地塘森林生态系统不同层次的水质效应. 生态学报, 2007, 25(5): 1838-1844.

[22] 赵金龙, 王泺鑫, 韩海荣, 康峰峰, 张彦雷. 森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2229-2237.

[23] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 自然资源学报, 2004, 19(4): 480-491.

[24] 肖燚, 陈圣宾, 张路, 岳平, 欧阳志云, 刘贤词. 基于生态系统服务的海南岛自然保护区体系规划. 生态学报, 2011, 31(24): 7357-7369.

[25] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity Production, and tradeoffs at landscape scales. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4-11.

[26] 周彬, 余新晓, 陈丽华, 张振明, 吕锡芝, 范敏锐. 基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟. 水土保持研究, 2010, 17(6): 9-13.

[27] 王敏, 阮俊杰, 姚佳, 沙晨燕, 王卿. 基于 InVEST 模型的生态系统土壤保持功能研究——以福建宁德为例. 水土保持研究 2014, 21(4): 185-189.

[28] 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 马飞. 汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估. 生态学报, 2013, 33(3): 798-808.
[29] Tallis H T, Ricketts T, Nelson E. InVEST2.1 beta User's Guide. Stanford: The Natural Capital project, 2010.
[30] 陈风琴, 石辉. 缙云山常绿阔叶林土壤大孔隙与入渗性能关系初探. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2005, 30(3): 350-353.
[31] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究——以东北黑土为例. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 88-95.
[32] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.
[33] 黄炎和, 卢程隆, 郑添发, 付勤, 许建金. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究. 水土保持学报, 1992, 6(4): 1-5.
[34] 贾芳芳. 基于 InVEST 模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
[35] 李秀彬, 赵宇鸾. 森林转型、农地边际化与生态恢复. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 91-95.
[36] 李海军, 张毓涛, 张新平, 韩占涛, 芦建江, 李翔. 天山中部天然云杉林森林生态系统降水过程中的水质变化. 生态学报, 2010, 30(18): 4828-4838.
[37] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 北京市森林生态系统土壤保持能力的综合评价. 水土保持学报, 2009, 16(1): 240-244.
[38] 侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 黄土丘陵区森林保持水土效益及其机理的研究. 水土保持学报, 1996, 3(2): 98-103.
[39] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
[40] 郭中伟, 甘雅玲. 关于生态系统服务功能的几个科学问题. 生物多样性, 2003, 11(1): 63-69.
[41] 刘世荣, 代力民, 温远光, 王晖. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望. 生态学报, 2015, 35(1): 1-9.

